

---

# Analyse spatio-temporelle de glissements de terrain littoraux par l'exploitation de données géospatiales multi-sources.

Candide Lissak<sup>1</sup>, Anne Puissant<sup>2</sup>, Olivier Maquaire<sup>1</sup>, Jean-Philippe Malet<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire LETG-Caen Géophen 'Géographie Physique et Environnement', UMR 6554 CNRS, Université de Caen Basse-Normandie  
Esplanade de la Paix, BP 5183, F-14032 Caen Cedex, France  
candide.lissak-borges@unicaen.fr, olivier.maquaire@unicaen.fr

<sup>2</sup>Laboratoire Image, Ville, Environnement, ERL 7230 CNRS/UdS  
3 rue de l'Argonne, F-67083 Strasbourg Cedex, France  
anne.puissant@live-cnrs.unistra.fr

<sup>3</sup>Institut de Physique du Globe de Strasbourg, UMR 7516 CNRS/UdS  
5 rue Descartes, F-67084 Strasbourg Cedex, France  
jeanphilippe.malet@unistra.fr

---

*RESUME.* Les versants littoraux du plateau du Pays d'Auge (Calvados) sont régulièrement affectés par des glissements de terrain. Les déplacements observés sont généralement lents (5-10 cm.an-1) mais certaines années des accélérations importantes ont provoqué des déplacements métriques (1982, 1988, 1995, 2001). Ces phénomènes induisent des dégâts directs aux infrastructures et des effets sur l'économie locale et régionale. Afin de caractériser l'évolution morphologique historique des versants, nous proposons une méthode d'analyse diachronique qui permet de quantifier les déplacements et la mobilité du trait de côte depuis 1808. Elle s'appuie sur l'analyse de documents historiques (archives) et de données géospatiales (cartes, cadastres, photographies aériennes, images satellitaires) dont les incertitudes ont été quantifiées.

*ABSTRACT.* The coastal slopes of the Pays d'Auge plateau (Calvados) are regularly affected by landslides. The displacements are small (5-10 cm.yr-1) but some important accelerations (with several meters of displacements) have been observed in 1982, 1988, 1995 and 2001. The processes have caused direct damages to infrastructures and to effects on the local and regional economical activity. To analyze the historical and morphological evolution of the slopes, we propose a diachronical method to quantify the displacements and the change of the coastline position since 1808. The analysis is based on numerous historical documents

*(archives) and spatial geodata (maps, cadastral surveys, aerial photographs, satellite images,) which uncertainties have been quantified.*

*MOTS-CLES : Glissement de terrain, géomorphologie, étude diachronique, SIG, archive.*

*KEYWORDS: Landslide, geomorphology, diachronical study, GIS, archive.*

---

## **1. Introduction**

Pour comprendre le comportement d'un versant affecté par des glissements de terrain, il est nécessaire de disposer d'informations sur son évolution au cours du temps (DUTI, 1986 ; Fall *et al.*, 2006). La stratégie d'analyse est pluridisciplinaire (géomorphologie, géotechnique/géophysique, géomatique) et combine différentes techniques d'observation pour la caractérisation des champs de déplacement (mesures topographiques, suivis GPS différentiels, corrélation d'images, analyse de Modèles Numériques de Terrain ; Malet *et al.*, 2002 ; Delacourt *et al.*, 2007 ; Kasperski *et al.*, 2010), de la structure du versant (investigations géophysiques et géotechniques ; Turner et Schuster, 1996 ; Jongmans et Garambois, 2007). Ces techniques performantes permettent de reconstituer l'évolution morphologique récente du versant sur des périodes de temps courtes (quelques années à quelques dizaines années). Pour une analyse sur des périodes de temps plus longues (Miserez *et al.*, 1982 ; Noverraz et Bonnard, 1990), l'analyse peut être effectuée à partir d'archives historiques (textes littéraires, journaux, documents municipaux ou paroissiaux, rapports d'étude, gravures anciennes et iconographies ; Bromhead *et al.*, 1998 ; Brunsden et Ibsen, 1993 ; Ibsen et Brunsden, 1996 ; Glade *et al.*, 2001). Tous les documents utilisés doivent d'abord être interprétés car les informations fournies ne sont généralement pas collectées à des fins scientifiques. Par exemple, les registres narratifs informent sur l'âge d'un événement, voire sur la date précise de son déclenchement et sur sa magnitude sans nécessairement préciser sa localisation ou sa durée (Brunsden et Ibsen, 1993). Une spatialisation est uniquement possible à partir de documents cartographiques et photographiques tels que des plans cadastraux, des planches topographiques précises, et des photographies aériennes.

Dans ce contexte, l'objectif de ce travail est de proposer une méthodologie reproductible pour analyser la dynamique ancienne d'un versant à partir de données géospatiales multi-sources disponibles sur la période 1808-2010. Le site d'étude est un versant côtier du Pays d'Auge (Calvados) affecté depuis plusieurs siècles par des glissements de terrain. La méthodologie d'analyse tient compte des incertitudes liées aux multiples sources de données pour évaluer les déplacements du versant et la mobilité du trait de côte (pied de versant). Le site est décrit et les données disponibles sont présentées (section §2). La méthodologie est ensuite présentée (section §3) en détaillant les techniques utilisées pour minimiser les contraintes liées à ce type d'analyse multi-sources. Enfin, les résultats de l'analyse des déplacements du versant et de la mobilité du trait de côte sont discutés (section §4).

## 2. Site d'étude et données disponibles

Le site d'étude est localisé sur le versant littoral du Pays d'Auge (Calvados) et s'étend sur environ 2 km entre Trouville-sur-Mer et Honfleur (Figure 1A). En janvier 1982, deux secteurs (Cirque des Graves et Fosses du Macre), encadrant le bourg de Villerville (Figure 1B) ont été affectés par des glissements de terrain importants avec des déplacements horizontaux pluri-décimétriques à métriques, des affaissements verticaux centimétriques à métriques et l'ouverture de fissures entraînant ainsi la destruction totale ou partielle d'une trentaine de bâtiments (Maquaire, 1990).

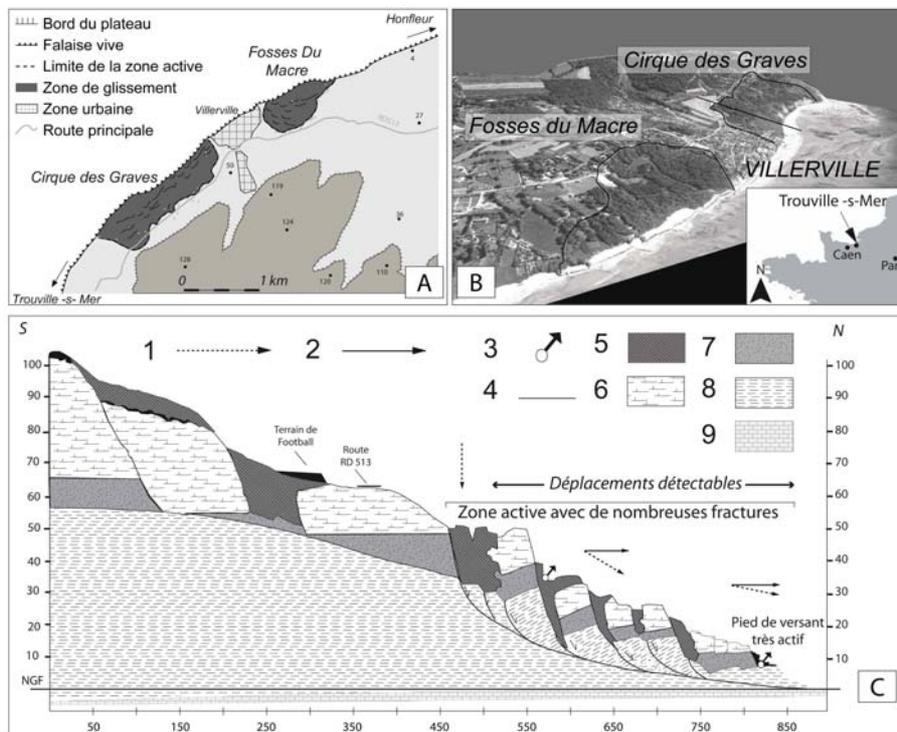


Figure 1. Localisation du site d'étude : A) Croquis topographique simplifié, B) Orthophotoplan de 2006 avec la localisation des deux cirques 'actifs'. C) Profil schématique géologique du Cirque des Graves (localisation sur la Figure 1B). 1) Vecteur déplacement, 2) Composante horizontale du vecteur, 3) Source, 4) Plan de glissement supposé, 5) Formation de versant, 6) Craie, 7) Sables, 8) Marnes, 9) Grès

Après cette accélération majeure, trois autres phases d'accélération ont été observées (en février 1988, janvier 1995 et mars 2001) contribuant à l'extension régressive et latérale de la zone active et à de nombreux dégâts (Lissak *et al.*, 2009).

La morphologie du versant présente, dans le détail, une topographie très caractéristique d'anciens glissements successifs emboîtés (Dikau *et al.*, 1996) avec, de l'amont vers l'aval, la succession d'escarpements métriques délimitant des replats parfois en contre-pente. Le versant se termine par un petit talus basal sub-vertical de quelques mètres de hauteur (Figure 1C) qui correspond au trait de côte. Les investigations ont montré que cette morphologie de surface correspondait à la succession de panneaux de craie intégrés dans des formations superficielles. Ces panneaux se sont détachés de la corniche du plateau crayeux du Pays d'Auge et ont glissé sur les sables glauconieux (argileux) et sur les marnes. L'absence de marqueurs géochronologiques ne permet pas une datation absolue, mais la phase initiale du glissement peut remonter au Weichselien ou au début de l'Holocène (Flageollet et Helluin, 1984 ; 1987). L'évolution de ces deux cirques, tout au long de l'Holocène, les a rendus impropres aux aménagements : de fait, le bourg de Villerville et son église du 12<sup>ème</sup> siècle ont été implantés dans l'axe d'un paléovallon (Figure 1A, 1B) remblayé par des formations drainantes et stables (Maquaire, 1990).

Ainsi, notre connaissance actuelle se résume à des informations indirectes sur l'instabilité des cirques, mais les vitesses de déplacement ne sont pas connues. Aucune phase d'accélération historique n'est mentionnée dans les archives, sauf l'occurrence de divers séismes datés de 1214, 1538, 1757 et 1880 (Chegaray, 1992 ; SisFrance), dont on ignore s'ils ont pu induire des désordres sur le versant. On peut supposer que l'évolution des cirques était plus ou moins continue, sans accélération brutale relatée ou sans conséquences observées sur les infrastructures puisque ces secteurs n'étaient, jusqu'au milieu du 19<sup>ème</sup> siècle, que peu ou pas aménagés. Ainsi, la comparaison de supports cartographiques et photographiques anciens devrait permettre d'estimer la dynamique du versant (e.g. déplacement) avant la 1<sup>ère</sup> accélération majeure connue de 1982.

Par ailleurs, les glissements sont : 1) à l'amont du versant, de type rotationnel (Figure 1C) avec des vecteurs-déplacements à composante principalement verticale et donc non détectable par la comparaison des documents cartographiques ou photographiques, 2) dans la partie médiane et à l'aval du versant, de type translationnel avec des vecteurs-déplacements à composante principalement horizontale et dirigés vers la mer et dont les caractéristiques pourront être détectées par la méthodologie proposée. Au Cirque des Graves, un secteur dans la partie aval du versant est caractérisé par une évolution de type coulée boueuse. Ce secteur d'étude présente donc des caractéristiques intéressantes pour l'étude présentée dans cet article.

Les données disponibles pour une analyse diachronique sont : 1) des documents géospatiaux (cartes topographiques, plans topographiques, levés cadastraux, photographies aériennes et images satellitaires) permettant une approche à différentes échelles et à différentes résolutions, et 2) des documents d'archives

(ouvrages littéraires, articles de presse, cartes postales, iconographies) permettant de compléter la connaissance des phénomènes passés et de les localiser approximativement. Les données géospatiales disponibles et utilisées représentent une vingtaine de documents (tableau 1) et les documents d'archives représentent une cinquantaine de documents couvrant une période de deux cents ans.

La figure 1 présente les caractéristiques des données en termes de date, d'échelle, de résolution et de format. La carte de Cassini de 1758 à l'échelle du 1/86 400ème est le document le plus ancien. Celui-ci n'a pas été retenu car aucun détail cartographique ne nous informait directement ou indirectement sur la morphologie du site, de même que pour la carte d'Etat-Major qui lui succède au début du 19ème siècle. Ainsi, les documents cartographiques les plus anciens utilisés sont les plans cadastraux au 1/2 500ème de 1808 pour la commune de Cricqueboeuf (Fosse du Macre) et de 1829 pour la commune de Villerville (Cirque des Graves). Ces plans cadastraux anciens sont complétés par des plans cadastraux plus récents (1961, 2007). Pour le plan de 1961, seul un assemblage à l'échelle du 1/5 000ème est disponible et non le document original à l'échelle du 1/2 500ème.

Document	Date	Echelle	Résolution raster (m)	Format	Source
<b>Plans cadastraux</b>	1808	1/2 500	0,5*0,5	Papier N&B	Archives CG 14**
	1829	1/2 500	0,5*0,5	Papier N&B	Archives CG 14
	1961*	1/5 000	0,35*0,36	Papier N&B	Conseil Général 14
	2007	1/2 500		Vectorisé	Conseil Général 14
<b>Plan topographique</b>	1976	1/2 000	0,15*0,20	Papier N&B	Bureau d'études
	2006	1/2 500	0,52*0,39	Papier N&B	Bureau d'études
Photographie aérienne	1955	1/25 000	1*1	Numérique N&B	IGN***
	1972	1/20 000	1*1	Numérique N&B	IGN
	1979	1/30 000	1*1	Numérique N&B	IGN
	1984	1/20 000	1*1	Numérique N&B	IGN
	1994	1/30 000	1*1	Numérique N&B	IGN
Orthophotographie	2000		0,5*0,5	Numérique Couleur	Conseil Général 14
	2002		0,5*0,5	Numérique Couleur	
	2006		0,5*0,5	Numérique Couleur	Conseil Général 14
Image satellite	2002		0,5*0,5	Numérique Couleur	Conseil Général 14
Levé Scanner Aéroporté LiDAR	2010		0,20*0,20	Nuage de point - MNT	Bureau d'études
Archives	Depuis 1853			Rapports, ouvrages, photos...	Archives diverses

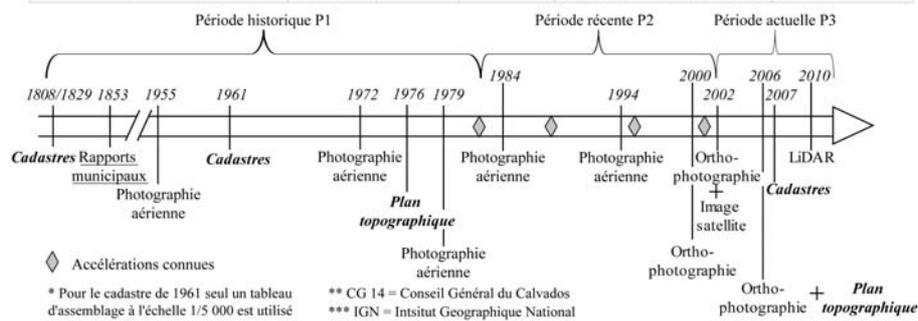


Figure 2. Synthèse descriptive des documents utilisés

Un plan de 1976 apporte des informations très précises sur la topographie (points cotés, courbes de niveau métriques), sur la localisation des bâtiments et sur la position du réseau routier avant l'accélération de 1982. Les photographies aériennes papier (noir et blanc) couvrent une période de 39 ans entre 1955 et 1994 pour des échelles variant entre 1/25 000 et 1/100 000ème. Sur les dix-huit séries disponibles, seules cinq séries ont été sélectionnées (Figure 2) en fonction de la localisation et de la qualité des clichés (1955, 1972, 1979, 1984, 1994). Les orthophotographies numériques couleurs sont disponibles depuis 2000. A partir de 2001, les sources documentaires sont plus nombreuses et peuvent être combinées, ce qui permet d'associer des informations obtenues sur des documents de nature variée pour des dates très proches (par exemple, l'orthophotographie de 2002 et une image satellitaire Quickbird de 2002 qui apportent des informations complémentaires).

Pour compléter ces documents, un Modèle Numérique de Terrain (MNT) issu de la BD ALTI® de l'IGN a été utilisé pour l'ortho-rectification des images aériennes. Un second MNT obtenu par krigeage de nuages de points d'une campagne LiDAR aéroporté réalisée en mai 2010 a été utilisé pour préciser la morphologie actuelle du versant et pour déterminer la position actuelle des escarpements.

### 3. Méthodologie d'analyse et évaluation de la qualité des données disponibles

#### 3.1 Approche méthodologique

L'analyse diachronique de la morphologie d'un versant peut être réalisée par la comparaison de différentes sources de données. L'approche, souvent utilisée en géomorphologie fluviale (Payraudeau *et al.*, 2008) et côtière (Costa, 1997 ; Albinet, 2001 ; Hénaff *et al.*, 2002 ; Pierre et Lahousse, 2004 ; Dornbusch *et al.*, 2006a ; 2006b), reste peu exploitée pour caractériser les déplacements d'un versant instable (*e.g.* distance cumulée ; DUTI, 1986 ; Maquaire, 1990 ; Martin et Weber, 1996 ; Glade *et al.*, 2001 ; Bonnard, 2006).

La figure 3 décrit la méthodologie proposée pour estimer quantitativement les déplacements du versant et la mobilité du trait de côte en tenant compte des incertitudes associées aux différentes sources d'information et aux traitements préalables (ortho-rectification, géoréférencement, digitalisation).

Compte tenu des moyens disponibles et de l'impossibilité de disposer de photographies aériennes anciennes de très grande échelle (1/10 000ème par exemple) et de leurs paramètres (altitude du vol, focale, ...) et d'avoir des repères pérennes au sol, un traitement photogrammétrique qui aurait pu donner des résultats d'une précision infra-métrique (Pierre et Lahousse, 2003) n'a pu être entrepris. L'alternative, moins précise, a été de procéder à une ortho-rectification des divers clichés aériens compte tenu 1) des faibles variations de la topographie à grande échelle et, 2) de la nécessité de traiter une grande série de clichés pour laquelle des couples stéréoscopiques n'étaient pas forcément disponibles. Toutefois, la marge d'erreur plurimétrique est largement compatible avec les déplacements cumulés (décamétriques) attendus sur la période de 200 ans.

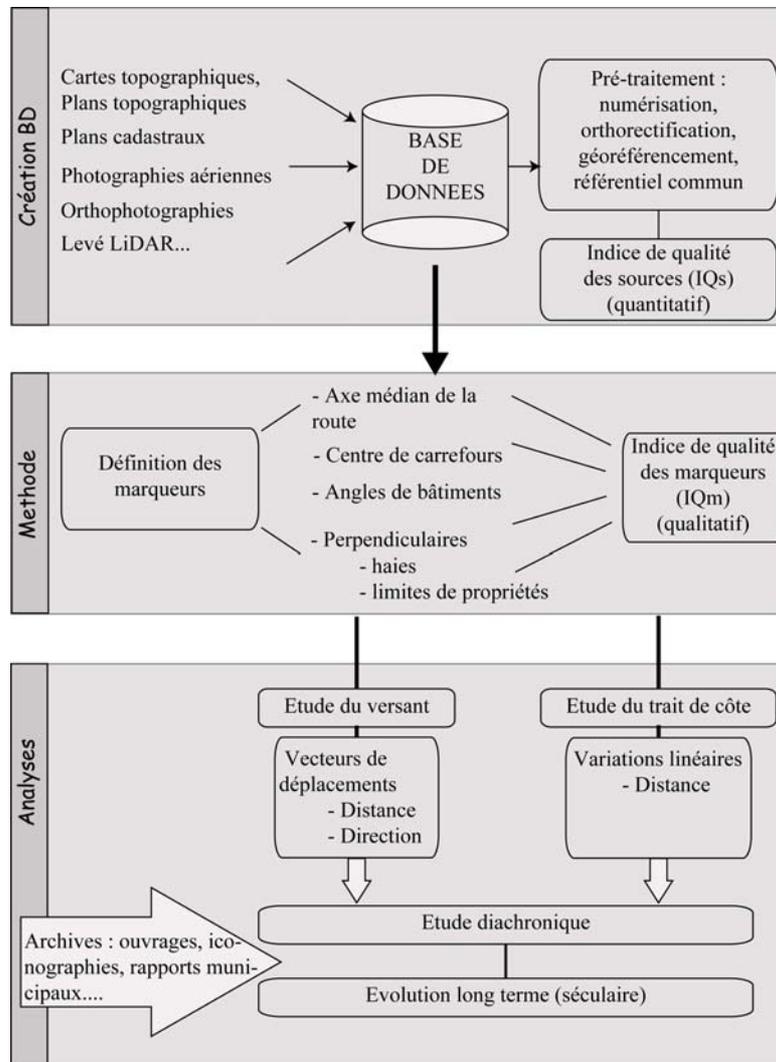


Figure 3. Organigramme méthodologique d'estimation des déplacements du versant et de la mobilité du trait de côte pour les différentes sources d'information utilisées

Une étape préalable à l'analyse consiste en la numérisation des sources et leur projection et géoréférencement dans un référentiel commun (*i.e.* Lambert 1 Carto ; Grosso, 2010). Les photographies aériennes ont été corrigées des distorsions induites par l'objectif lors de la prise de vue en utilisant les certificats de calibration de l'IGN, puis orthorectifiées à partir du MNT issu de la BD ALTI® de l'IGN à l'aide du logiciel ENVI®. Les différents plans topographiques et cadastraux ont été recalés dans un référentiel commun en utilisant des points d'amer localisés dans les zones

stables du versant (angle de mur de bâtiments, croisement de routes) et identifiables sur le plan topographique de 1976 et sur l'orthophotographie de 2006 qui ont été utilisés comme documents de référence.

Une dizaine de points sont nécessaires, au minimum, pour chaque document afin d'appréhender les déformations des documents (Figure 4). La situation de la zone d'étude en bordure littorale est une contrainte majeure pour optimiser la répartition des points d'amer sur toute la zone de façon homogène ; ainsi les points d'amer sont prioritairement localisés, en secteur réputé stable, autour de la zone active pour limiter les déformations dans cet espace.

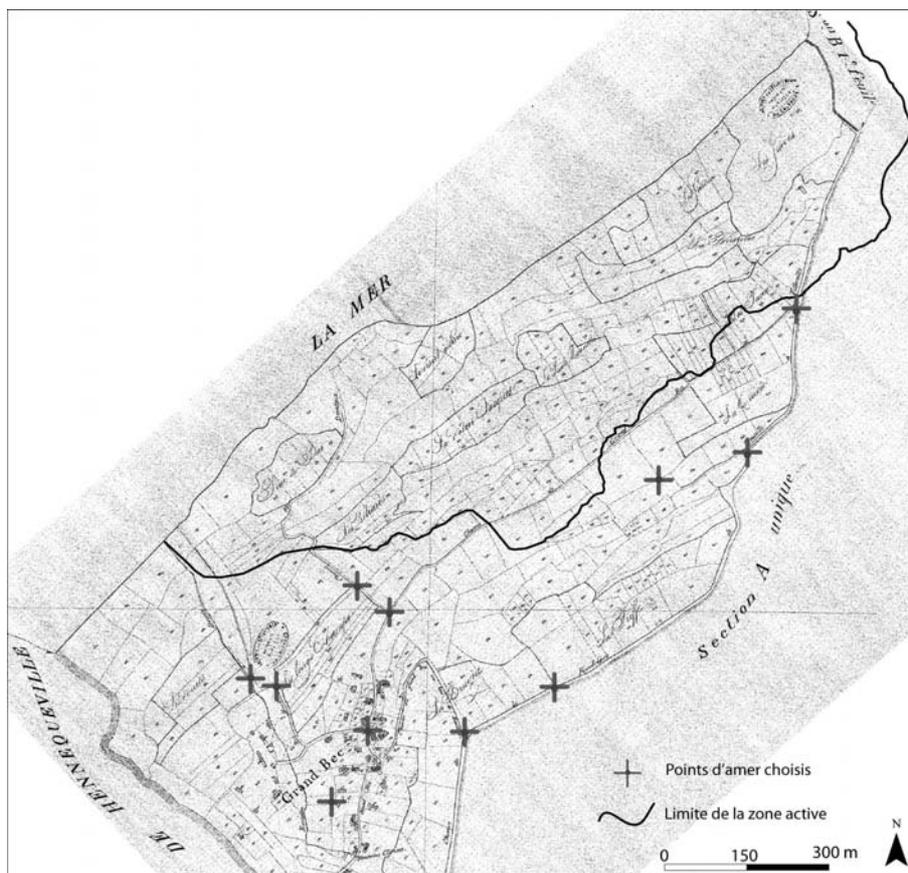


Figure 4. Plan cadastral de 1829 du Cirque des Graves et localisation des points d'amer sélectionnés dans les zones stables du versant

L'approche adoptée consiste ensuite, à partir des documents multi-sources, à calculer des vecteurs-déplacements (selon l'axe de la plus grande pente) à partir de 'marqueurs' de suivi. Ces 'marqueurs' sont situés dans les zones instables et

constituent des indices géomorphologiques de l'évolution du versant (DUTI, 1986). Ils correspondent aux angles de murs de bâtiments, à la ligne médiane du tracé de la route, à la perpendiculaire de haies bocagères (qui marquent la plupart des limites de propriétés) et de limites de propriétés (Figure 5).

Si les documents cartographiques comme les plans cadastraux offrent des informations directes (position directe du 'marqueur') et permettent de comparer des 'marqueurs' identiques aux limites bien définies, les documents photographiques nécessitent une interprétation (position indirecte). Si la nature ou la fonction d'un objet ne peut être identifiée, des informations issues des archives sont utilisées (localisation et identification de la nature d'un bâtiment ou d'une route sur des photographies terrestres ou des cartes postales).

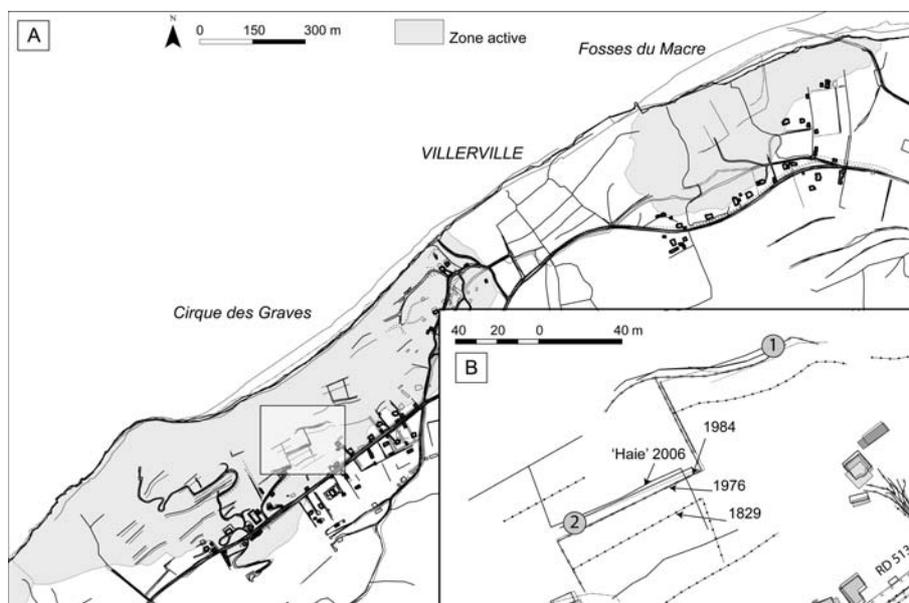


Figure 5. Exemple de positions successives de 'marqueurs haies' identifiés à partir des documents disponibles entre 1829 et 2010. B) Zoom sur les marqueurs n°1 & 2 utilisés à la figure 11

Ainsi, la précision de la mesure de déplacement dépend de l'identification correcte des 'marqueurs' en termes de typologie et de tracé géométrique (Dornbusch *et al.*, 2006b). La digitalisation est elle-même fonction de la qualité des sources d'information spatiales et de leur interprétation (Figure 6). Deux indices de qualité ont été utilisés :

Tableau 1. Définition de l'indice de qualité de précision géométrique des sources d'information ( $IQ_S$ ) et de l'indice de détermination des 'marqueurs' ( $IQ_M$ )

Indice de qualité – $IQ_S$	Niveau de qualité	Interprétation
1	Qualité faible	$RMSE \geq 4$
2	Qualité moyenne	$1,5 < RMSE < 3,5$
3	Qualité haute	$1 < RMSE < 1,5$
Indice de qualité – $IQ_M$	Niveau de qualité	Identification / Interprétation
1	Qualité faible	Identification et interprétation très difficile
2	Qualité moyenne	Identification aisée mais interprétation difficile qui nécessite le croisement avec d'autres sources d'information
3	Qualité haute	Identification et interprétation aisées et certaines

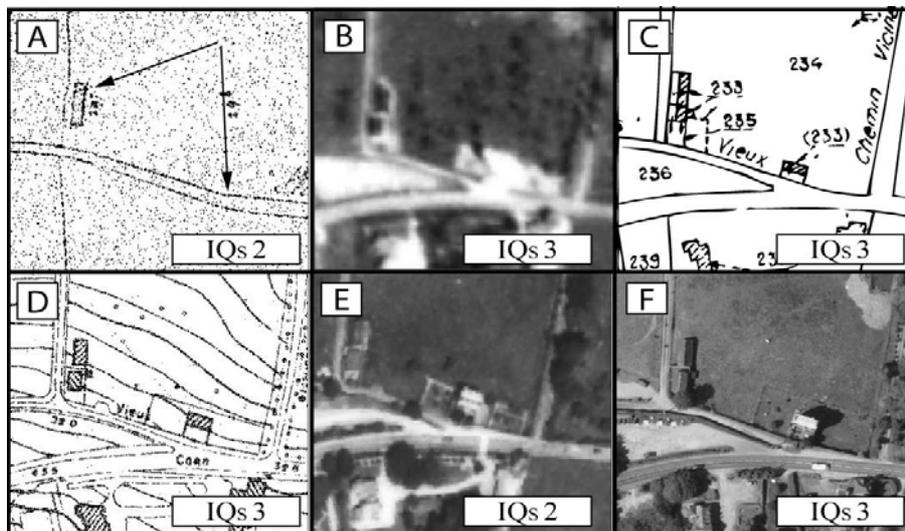


Figure 6. Exemple de 'marqueurs' potentiels (bâtiment, routes) indiqués par une flèche sur l'onglet A puis localisés sur des documents acquis à plusieurs dates dans les Fosses du Macre. La valeur de l'indice de qualité des sources  $IQ_S$  est indiqué pour chaque type de documents (A. cadastre de 1808, B. photographie aérienne de 1955, C. plan cadastral de 1961, D. plan topographique de 1976, E. photographie aérienne de 1984, F. orthophotographie de 2006)

- Un indice de qualité de chacune des sources d'information ( $IQ_s$ , Tableau 2) ; le critère d'erreur quadratique moyenne (RMSE) est utilisé pour quantifier les erreurs géométriques d'ortho-rectification des photographies aériennes et de géoréférencement des documents cartographiques (Hugues *et al.*, 2005). Cet indice est distinct de la qualité du document qui est aussi fonction de sa résolution ;
- Un indice de qualité de détermination des 'marqueurs' pour une source d'information ( $IQ_M$ , Tableau 1). Les valeurs attribuées aux deux indices sont indiquées dans le Tableau 1.

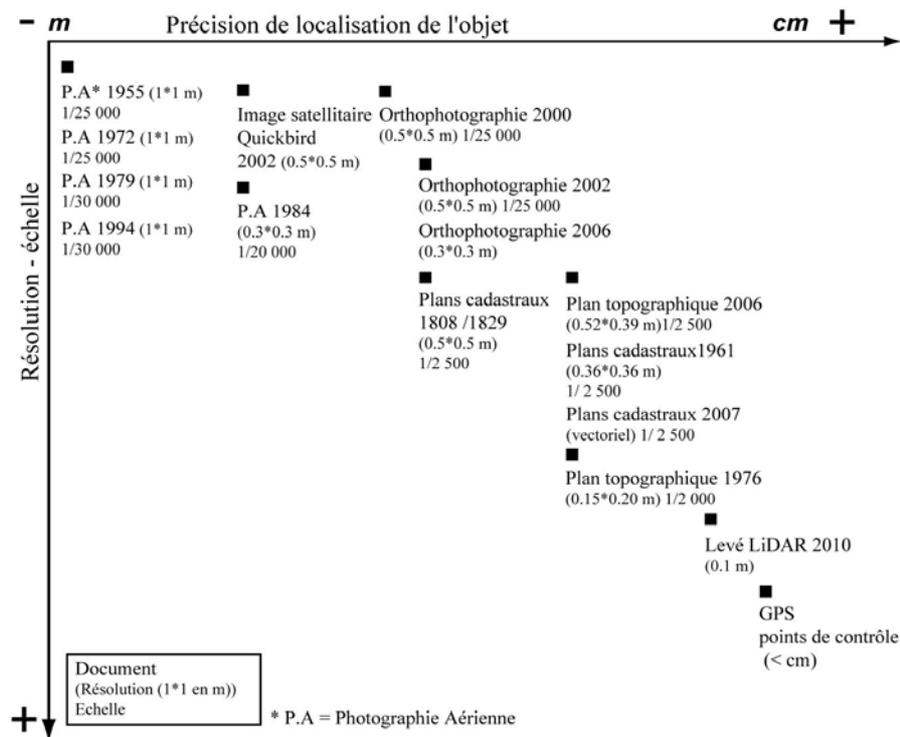


Figure 7. Précision de localisation des objets en fonction de l'échelle et de la résolution des données disponibles

La figure 7 décrit la précision des sources de données et la précision des 'marqueurs' en fonction de la résolution et de l'échelle des documents. Puisque les écarts de résolution sont importants entre les sources récentes (image satellitaire 'Quickbird', orthophotographies, plans topographiques), le positionnement des 'marqueurs' défini par interprétation d'images a été validé par des mesures de terrain par GPS différentiel et par l'interprétation d'un levé LiDAR aéroporté (de précision < 0,02 m en planimétrie) (cf. section 4.2). Depuis 2007, les déplacements

sont mesurés par GPS différentiel à partir d'un réseau de 21 bornes fixes réparties sur les deux cirques (Lissak *et al.*, 2010), ce qui permet de caractériser les déplacements avec une précision centimétrique.

### 3.2 Évaluation de la précision des sources d'information

Les erreurs quadratiques moyennes (RMSE) ont été calculées pour l'ensemble des données géospatiales à l'aide de 22 points de contrôle relevés par GPS différentiel sur le terrain et dont la précision planimétrique est de 0,05 m (Kasser et Egels, 2001 ; Casson, 2004; Dornbusch *et al.*, 2006a ; 2006b). Les points de contrôle, facilement repérables sur les différents documents (Hughes *et al.*, 2005) et localisés dans des secteurs stables, correspondent à des angles de bâtiments, des coins de rues et des carrefours et ont été sélectionnés de façon à couvrir au maximum la zone d'étude (Richards, 1986).

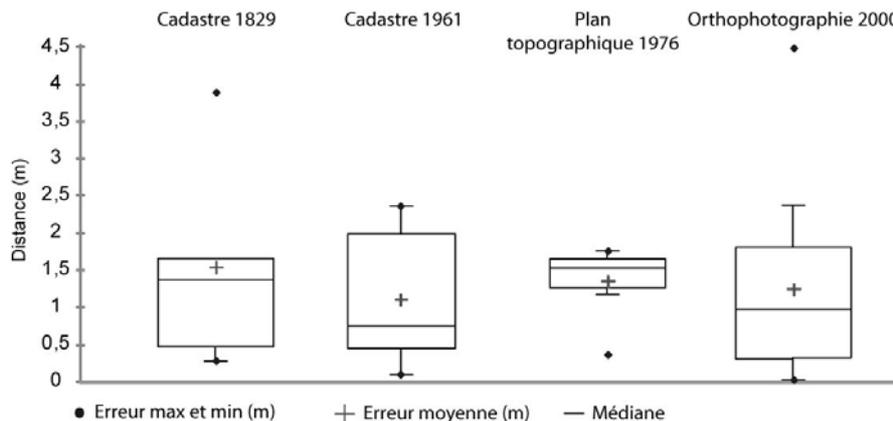


Figure 8. Boxplots des distances entre la position des points mesurés par GPS différentiel et par interprétation des documents, qui indiquent les erreurs de positionnement pour les documents de 1829, 1961, 1976 et 2000

Pour la plupart des données géospatiales, les RMSE calculées lors de l'orthorectification ou du calage sont faibles (inférieures à 2,5 m) compte-tenu des échelles de prise de vue ou de représentation cartographique. L'erreur varie entre 0,4 m (pour l'orthophotographie de 2006 qui est la source de données la plus précise) et 2,0 m (pour le cadastre napoléonien de Cricqueboeuf de 1806 qui est le document le moins précis) ; les écarts entre points de contrôle mesurés par GPS différentiel et ceux identifiés sur chaque source peuvent varier spatialement de quelques centimètres à 3,5 m sur un même document. Pour le plan cadastral de 1961, l'importante dispersion spatiale du décalage (entre les points mesurés par GPS différentiel et ceux identifiés sur le document) s'explique par des déformations liées à l'assemblage et à la réduction au 1/5 000ème du document original. Le plan

topographique de 1976 montre au contraire des décalages très faibles et répartis de manière homogène (Figure 8). D'autre part, la répartition des points d'amer pour l'orthorectification et le géoréférencement, et celle des points de contrôle ne sont pas optimales compte-tenu de la contrainte liée à la présence de la mer. Enfin, l'orthophotographie de 2000 présente une précision inférieure aux autres orthophotographies en raison d'une acquisition en coordonnées Lambert 93 puis d'une projection en coordonnées Lambert 1 Carto. Les documents sur lesquels les erreurs quadratiques moyennes sont supérieures à 3 m n'ont pas été retenus.

### 3.3 Évaluation de la qualité des 'marqueurs' de déplacement

Pour chaque 'marqueur' identifié sur les documents, l'indice de qualité  $IQ_M$  a été défini (Tableau 2) ; la figure 9 illustre l'attribution de l'indice pour un extrait de la zone d'étude sur le Cirque des Graves.

Un  $IQ_M$  de valeur 1 (qualité faible) a été attribué lorsque l'identification et l'interprétation du 'marqueur' sont très difficiles; c'est par exemple le cas de la route du Château du Manoir (localisée au sud-est de la figure 9) qui présente un tracé très différent sur plusieurs documents alors que la route est localisée dans un secteur stable du versant. Cette variation correspond probablement à une rectification anthropique du tracé sur le terrain.

Un  $IQ_M$  de valeur 2 a été attribué lorsque l'identification du 'marqueur' est aisée mais que son interprétation nécessite le croisement avec d'autres sources d'information. C'est le cas du tracé de la route du littoral (RD 513 ; Figures 1, 5). Cette route subit régulièrement des déformations car elle traverse à plusieurs endroits des secteurs instables. Son tracé est identifiable dès 1829 et son emprise plus ou moins large en fonction des documents. Cette route a subi de nombreuses transformations notamment une dérivation en amont de la zone 'active' à la fin du 19ème siècle (premier tracé sur le cadastre de 1829 avec des témoignages dans la littérature, puis un changement de tracé visible sur certaines gravures anciennes. Son ancien tracé correspond aujourd'hui à un chemin assez étroit qui est devenu impraticable pour les véhicules. Dans plusieurs ouvrages littéraires, il est indiqué que cette 'ancienne' portion de route était empruntée par des calèches et des charrettes (Malte-Brun, 1881 ; Flaubert, 1924). Ce témoignage renforce l'hypothèse que les déplacements du versant ont été lents et continus sur une longue période et sans accélération brusque avant la période récente 1982. En effet, une accélération antérieure à 1982 aurait peut-être fait l'objet d'articles dans les journaux ou de requêtes auprès de l'administration.

Un  $IQ_M$  3 a été attribué lorsque l'identification et l'interprétation sont aisées et certaines. Sur la figure 9, une valeur de 3 a été attribuée dans le cas où, en zone instable, les limites parcellaires se superposent (cas des limites orientées perpendiculairement à la ligne de plus grande pente) ou se décalent de manière cohérente avec la direction attendue des déplacements (vers l'aval, ou dans la direction de plus grande pente) sans ambiguïté dans le tracé du 'marqueur'.

Prenons l'exemple de la figure 6 qui présentent différents extraits de sources de données sur lesquels différents 'marqueurs' (route, bâtiment) sont plus ou moins identifiables selon la résolution du document. C'est notamment le cas du 'marqueur' bâti et du 'marqueur' route précisés par les flèches sur la figure 6A. Sur les différentes sources, ces marqueurs sont visibles mais la digitalisation des contours nécessite une interprétation. Ainsi, pour un même objet, un indice de qualité ( $IQ_M$ ) peut être différent en fonction de la résolution de la source : par conséquent, cet objet ne sera pas nécessairement exploitable sur tous les documents. Sur la figure 5B, le marqueur 'bâti' n'a, par exemple, pas pu être exploité en raison de la qualité médiocre de la photographie aérienne de 1955.

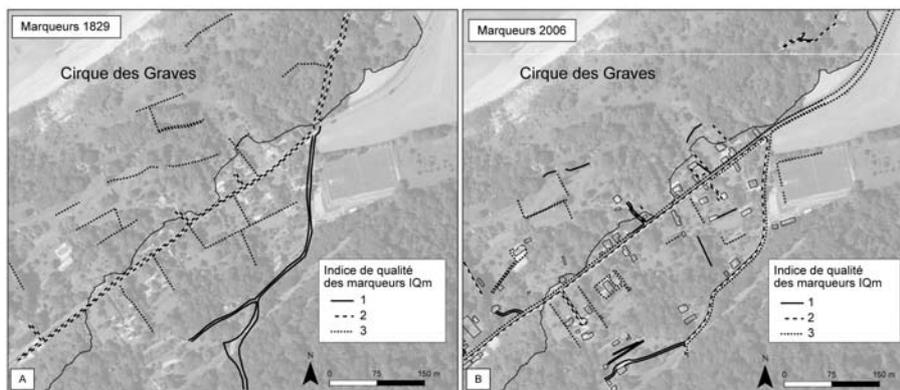


Figure 9. Exemples de 'marqueurs' (routes, limites de propriété, haies) et indices de qualité  $IQ_M$  associé pour le plan cadastral de 1829 et le MNT issue du levé LiDAR aéroporté de 2010 (superposé sur l'orthophotographie de 2006 pour faciliter la lecture et le repérage) pour le secteur du Cirque des Graves

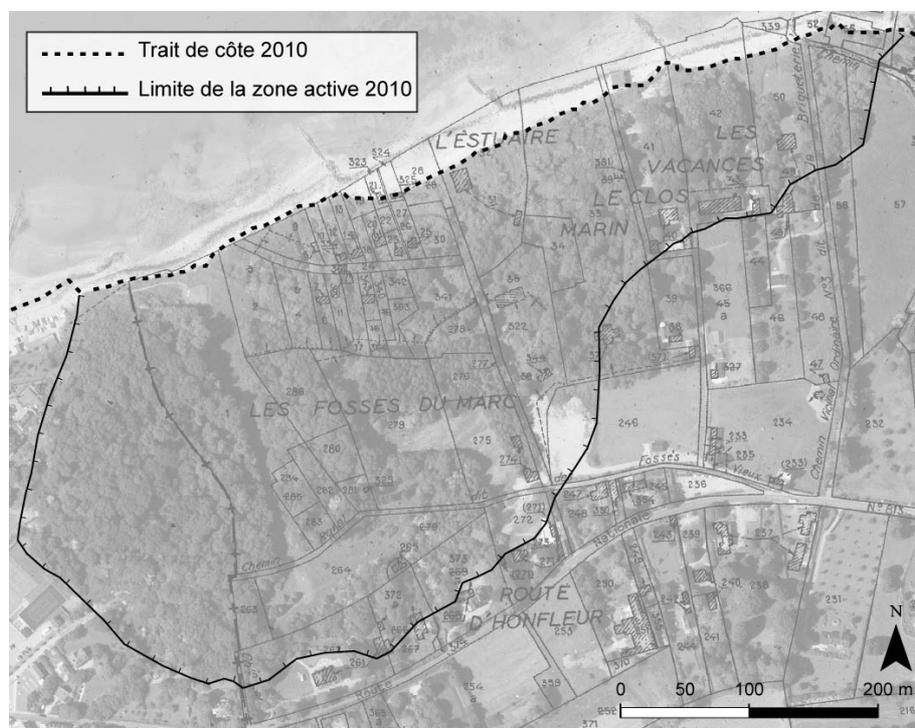


Figure 10. Superposition du plan cadastral de 1961 et de l'orthophotographie de 2006 pour le secteur des Fosses du Macre

En résumé, les 'marqueurs' 'limites de parcelles' sont facilement identifiables et interprétables sur l'ensemble des documents et présentent les indices les plus élevés ( $IQ_M 3$ ), sauf dans le cas où ces marqueurs sont parallèles à la direction des déplacements ; dans ce cas, il n'y aura aucun décalage significatif du marqueur en cas de mouvement comme cela a été observé pour les Fosses du Macre (Figure 10). L'indice  $IQ_M$  est alors égal à 1. Les 'marqueurs' 'bâtiments', qui présentent des emprises au sol variables selon les documents ont des indices de qualité moyenne ( $IQ_M 2$ ). Enfin les 'marqueurs' 'route' ont les indices de qualité les plus faibles ( $IQ_M 1$ ), car la largeur des chaussées varie beaucoup entre les documents (par exemple, un même tronçon de la RD 513 mesure 7,70 m sur le plan cadastral de 1961 et 5,80 m sur l'orthophotographie de 2006). Le premier document prend en effet en compte l'emprise totale de la route (chaussée bitumée et accotements herbeux), alors que dans le second document, la route bitumée est aisément identifiable par contraste de couleur, d'où une largeur 'apparente' moindre. Sur les photographies aériennes, dans les secteurs très boisés, le couvert végétal est si dense qu'il est rarement possible d'identifier les bâtiments ou les chemins, comme sur le quart nord-ouest du Cirque des Graves (Figure 9) ou aux Fosses du Macre (Figure 10).

Tableau 2. Nombre de marqueurs identifiés pour chaque sources et indices de qualité de précision des 'marqueurs' ( $IQ_M$ ) associés

	$IQ_M = 1$	$IQ_M = 2$	$IQ_M = 3$	Total
Plan cadastral 1808/1829	8	17	52	77
Photographie aérienne 1955	4	6		10
Plan cadastral 1961	9	39	93	141
Photographie aérienne 1972	2	4	8	14
Plan topographique 1976	15	45	138	198
Photographie aérienne 1979	2			2
Photographie aérienne 1984	20	25	30	75
Photographie aérienne 1994			5	5
Orthophotographie 2000	20	36	4	60
Orthophotographie 2002	4	8	5	17
Image satellite Quickbird 2002		9	11	20
Plan topographique 2006			20	20
Orthophotographie 2006	67	53	77	197
MNT LiDAR 2010			98	98
Total	151	242	541	934

Au final, 934 'marqueurs' ont été identifiés et interprétés sur l'ensemble des sources géospatiales, dont 460 situés dans la zone active (en glissement) du versant. 541 marqueurs présentent un indice  $IQ_M$  de valeur 3, 242 marqueurs présentent un indice  $IQ_M$  de valeur 2 et 151 marqueurs présentent un indice  $IQ_M$  de valeur 1 (Tableau 2). Ainsi, certaines sources comportant peu de marqueurs de bonne qualité n'ont pu être utilisées systématiquement sur l'emprise totale de la zone d'étude.

#### 4. Résultats de l'analyse diachronique

##### 4.1 Caractérisation des déplacements du versant dans le Cirque des Graves

L'étude diachronique permet de quantifier la composante horizontale des déplacements pour différentes zones instables dans le secteur du Cirque des Graves (l'absence de 'marqueurs' exploitables dans le secteur des Fosses du Macre, en zone boisée, ne le permet pas) ainsi que la mobilité du trait de côte sur les deux derniers siècles.

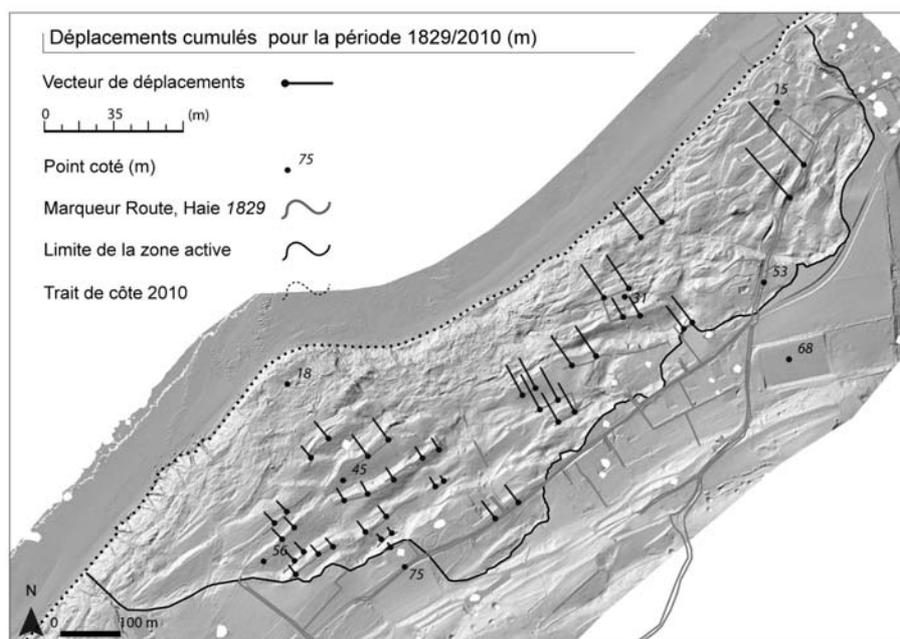


Figure 11. Déplacements totaux pour la période 1829 – 2010 sur le Cirque des Graves en comparant plans cadastraux, orthophotographies, MNT issu du LiDAR aéroporté et relevés de terrain

Il faut garder à l'esprit que dans la partie amont de la zone instable, à la limite de l'escarpement principal, les déplacements sont principalement à composante verticale et que la valeur de la composante horizontale est parfois trop faible pour être estimée par comparaison de documents (Figure 1C).

La figure 11 présente les vecteurs-déplacements entre 1829 et 2010 pour différents 'marqueurs' communs aux deux dates sur le secteur du Cirque des Graves. Cette cartographie met en évidence, comme on pouvait s'y attendre, l'hétérogénéité spatiale des déplacements cumulés. Pour les secteurs les plus actifs, les déplacements atteignent environ 20 m, et pour les secteurs les moins actifs, ils sont de l'ordre de 5 m. Dans le secteur oriental, le seul 'marqueur' commun aux différents documents utilisés est le Chemin des Graves (avec un indice de qualité  $IQ_M$  faible, de valeur 1) dont la mobilité indiquerait un déplacement très important de l'ordre de 35 m. Cette très forte valeur apparaît irréaliste, et indiquerait plutôt une modification anthropique du tracé de ce chemin lors des aménagements survenus dans ce secteur dans les années 1950 lors de la création d'un camping.

Entre 1829 et 2010, les déplacements horizontaux cumulés (Figure 11 et Figure 12) de six 'marqueurs' de types différents (route, haie) localisés dans le Cirque des Graves (Figure 13), indiquent une tendance assez régulière sur le long terme. Ces

déplacements estimés intègrent des phases de déplacements lents plus ou moins continus entrecoupées par des accélérations brusques (comme en 1982, 1988, 1995 et 2001).

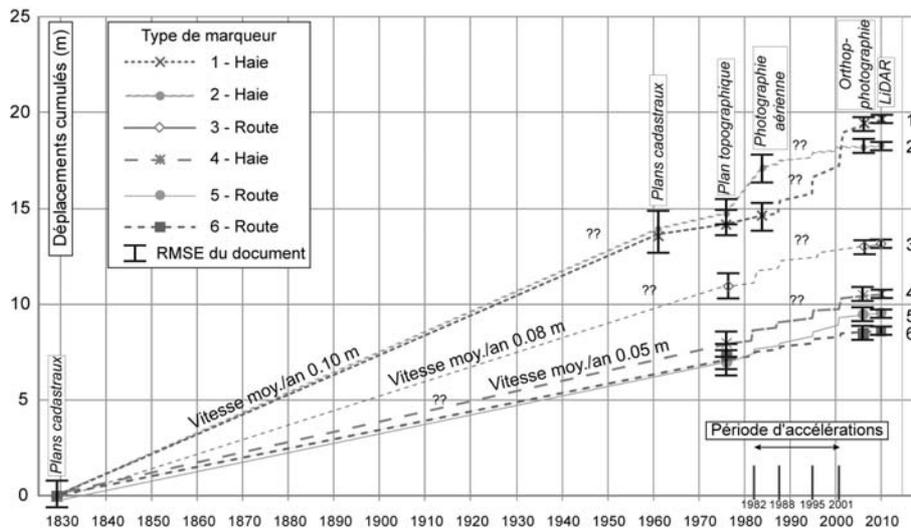


Figure 12. Exemple de déplacements cumulés (1829-2010) de six 'marqueurs' localisés au centre et en périphérie du Cirque des Graves à Villerville. Les 'marqueurs' sont localisés sur la figure 12. Les points d'interrogation « ?? » sont indiqués pour signifier l'absence d'information sur d'éventuelles accélérations ou bien sur les valeurs de déplacements liées à ces accélérations depuis 1982

Les tendances identifiées permettent de démontrer que le versant n'a pas connu de longues périodes de stabilité ce que corrobore l'absence de constructions dans le Cirque des Graves, les populations préférant s'installer à l'amont immédiat de la zone instable (le long de la route) dans des secteurs réputés stables. Jusqu'aux années 1970, aucune archive ne mentionne un quelconque événement majeur ayant entraîné des dégâts. Par contre, dans d'autres secteurs habités du Pays d'Auge et affectés par des mouvements de versants, les articles de presse et les demandes de subvention auprès de l'administration ont été nombreuses pour cette même période. Cela laisse supposer une relative stabilité aux Graves. D'ailleurs, après les années 1950, avec la pression foncière, des aménagements sont entrepris dans la partie médiane du Cirque des Graves et dans le secteur du camping à l'est du bourg de Villerville. Ainsi, en l'absence d'accélérations brutales entre 1829 et 1960, le déplacement moyen serait d'environ 0,10 m/an pour les marqueurs 1 et 2 situés en partie médiane du versant. Pour les quatre autres marqueurs situés plus en l'amont, les déplacements moyens sont logiquement plus faibles et compris entre 0,05 et 0,08 m/an (Figure 13).

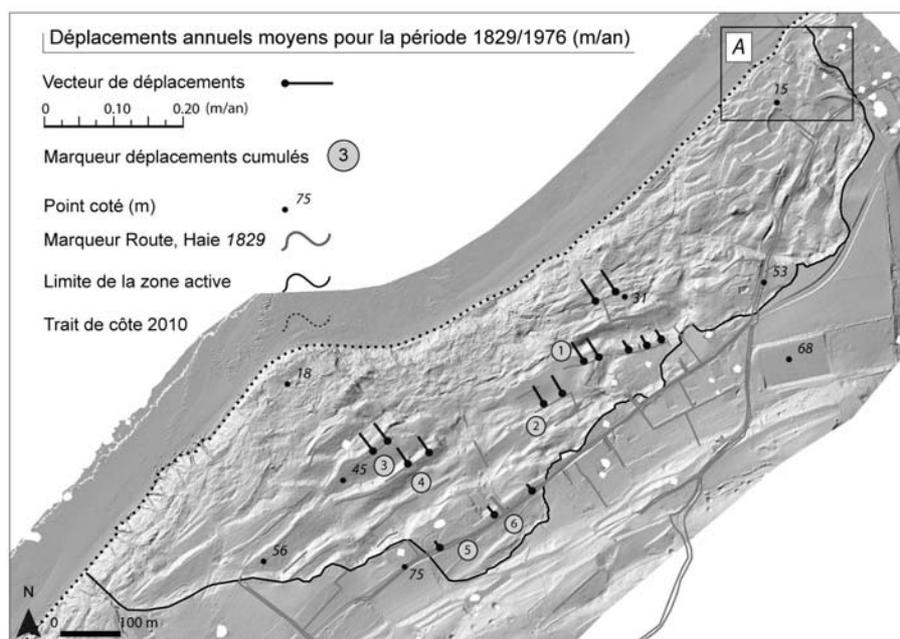


Figure 13. Déplacements annuels moyens pour la période 1829 – 1976 sur le Cirque des Graves en comparant plan cadastral et plan topographique

Les valeurs moyennes annuelles de déplacements estimées à partir de l'étude diachronique (Figure 13) ont été comparées avec celles obtenues par le suivi récent d'un réseau de repères bétonnés répartis sur la zone d'étude depuis 1985 et dont les positions ont été relevées par tachéométrie (1985-2008) puis par GPS (après 2008) (Maquaire, 1990 ; Lissak *et al.*, 2010 ; Figure 14). La distribution historique des déplacements apparaît globalement conforme à la distribution actuelle sur la période 2008-2010. Le tableau 3 fournit, pour trois points sélectionnés en fonction de la nature du 'marqueur' (bâti, haie et route) et de leur répartition sur le site (Figure 14), des valeurs de comparaison avec des repères bétonnés situés à quelques mètres de ces marqueurs. Il a été montré (Maquaire, 1990) que les déplacements enregistrés sur un repère implanté sur un panneau de craie, traduisaient le déplacement de l'ensemble de ce panneau (limité à l'aval par un escarpement net correspondant très souvent à une limite de propriété renforcée par une haie bocagère). Ces panneaux structurent et compartimentent la zone en glissement en unités morphologiques distinctes (Lissak *et al.*, 2010) qui peuvent se déplacer à des rythmes et des valeurs différents (Maquaire, 1990). Ainsi, il est possible de comparer les déplacements obtenus à partir des repères avec ceux de 'marqueurs' proches pour des unités morphologiques identiques. Il est ainsi possible de définir des vitesses moyennes annuelles par secteur ; c'est le cas, par exemple, pour le secteur de la 'Pointe du Heurt' où les valeurs historiques estimées par comparaison d'images et les

déplacements moyens annuels mesurés aujourd’hui par technique géodésique concordent globalement. Néanmoins, il apparaît que les valeurs estimées dans ce secteur aient diminué. Ce secteur a subi de nombreux dégâts lors des crises précédentes, notamment le long de la route où sont localisés les déplacements les plus forts (Figure 11).

Tableau 3. Comparaison de déplacements cumulés de certains ‘marqueurs’ estimés par interprétation d’images et mesurés sur le terrain (localisation figure 14)

Marqueur	Vitesse moyenne annuelle (mesure image) Période 1961/1976 (m/an)	Repère topographique	Vitesse moyenne annuelle (mesure terrain) Période 2008/2010 (m/an)
A (Bâti)	0,08	402	0,07
B (Haie)	0,17	404	0,10
C (Route)	0,04	408	0,05

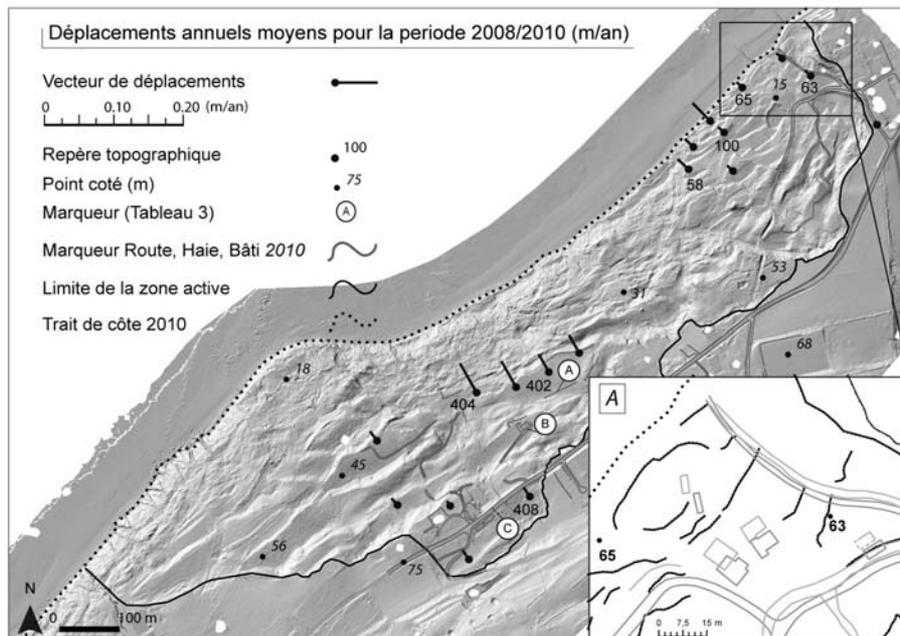


Figure 14. Déplacements annuels moyens pour la période 2008 – 2010 sur le Cirque des Graves obtenus à partir du réseau de surveillance (topométrie & GPS). A. Zoom sur le secteur de l’ancien camping du Cirque des Graves (Figure 15)

Tableau 4. Déplacements estimés de quelques 'marqueurs' situés dans le secteur de l'ancien camping au Cirque des Graves. Les marqueurs sont localisés sur la figure 15

Marqueur	Déplacements estimés :				
	1976-2006	Pré-accélération 1976-1982	Post-accélération 1982-1985	Réseau surveillance 1985-2006	Accélération de 1982
1 (Bâti)	10,5	0,6	0,5	2,0	7,4
2 (Route)	9,0	0,5	0,3	1,1	7,1
3 (Bâti)	8,8	0,5	0,3	1,1	6,9
4 (Bâti)	8,8	0,5	0,3	1,1	6,9
5 (Bâti)	6,5	0,3	0,1	0,7	5,4
6 (Route)	6,5	0,3	0,1	0,7	5,4
7 (Route)	6,5	0,3	0,1	0,7	5,4

A plus court terme, dans le secteur de l'ancien camping (Figure 15), la comparaison de la position de quelques marqueurs (bâti et chemin) bien visibles sur le plan topographique de 1976 et sur l'orthophotographie de 2006 permet d'accéder à une estimation inédite des valeurs de déplacements occasionnés par l'accélération de 1982 (Figure 15). Tout d'abord, on constate que les déplacements décroissent de l'aval vers l'amont (Tableau 4) : de 10,50 m pour le marqueur 'bâtiment' n°1 à 6,50 m pour les deux marqueurs n° 6 et 7 'route' (chemin des Fondrières). A ces valeurs, il faut retrancher les déplacements estimés : 1 ) de 0,60 m à 0,30 m (selon les témoignages recueillis) pendant la période pré-accélération entre 1976 et 1982 ; 2 ) de 0,50 m à 0,10 m correspondant à un amortissement post-événement entre 1982 et 1985 (comme cela est suggéré après la dernière accélération de 2001 sur la figure 14A) ; 3 ) de 2,0 m à 0,7 m correspondant aux déplacements de surface mesurés entre 1985 et 2006 (Figure 15) sur les bornes n°63 et n°65 proches des 'marqueurs'.

Ainsi, les déplacements horizontaux pendant l'accélération de 1982 auraient atteint des valeurs de l'ordre de 7,4 m à l'aval à 5,4 m jusqu'au chemin des Graves. Ces valeurs qui sont de simples estimations sont tout de même intéressantes et apparaissent assez conformes à l'idée que l'on pouvait s'en faire en parcourant les récits relatant cette crise de 1982 et en observant les photographies des dommages.

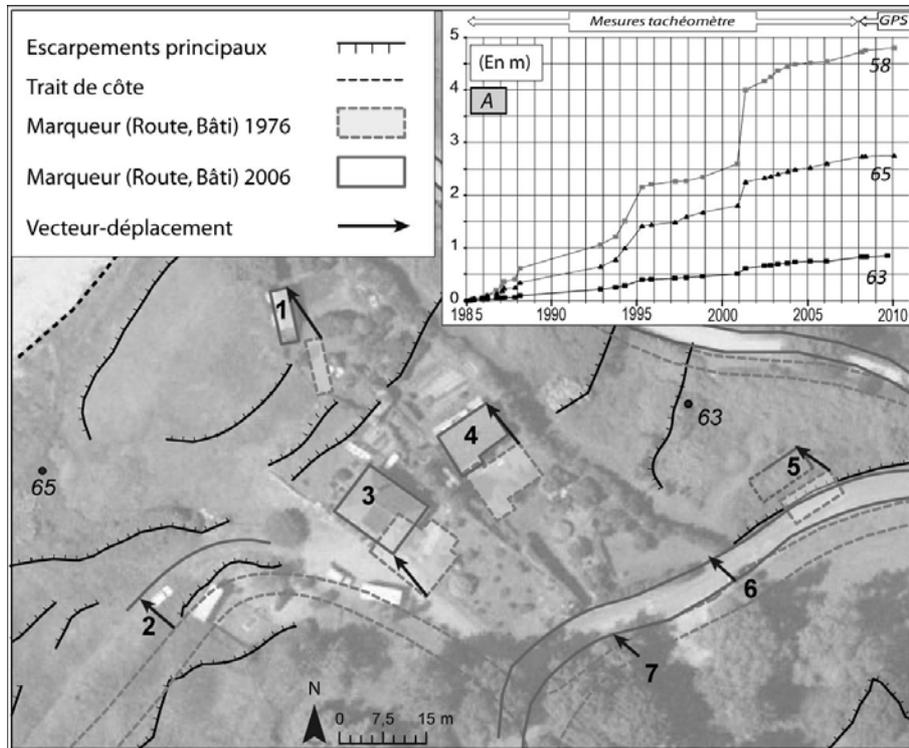


Figure 15. Positions successives de quelques marqueurs en 1976 et en 2006 dans le secteur de l'ancien camping du Cirque des Graves. A. Déplacements cumulés de 3 repères bétonnés du réseau de surveillance (topométrie & GPS) entre 1985 et 2010

#### 4.2 Caractérisation de la mobilité du trait de côte

Sur la zone d'étude, l'action érosive de la mer au pied du versant constitue un des facteurs de contrôle des glissements (Maquaire, 1990) en empêchant le versant d'acquiescer un profil d'équilibre. Le recul du trait de côte (défini par le sommet du talus basal terminant le versant en haut de plage) est cependant ralenti par l'allongement du versant. Ainsi, la position du trait de côte a subi d'importantes variations depuis deux siècles (Figure 16) caractérisées par (d'est en ouest) :

- un recul assez marqué aux Fosses du Macre, qui atteint sur la période 1808-2010 des valeurs comprises entre 18 et 200 m. Ce recul historique est cohérent avec les observations actuelles qui montrent un pied de versant continuellement entaillé dans des formations sablo-graveleuses sensibles à l'érosion par la houle et les courants. A l'est, le recul le plus important correspond à un petit marais littoral fermé par un cordon sableux facilement érodable ;

- une stabilité, voire une légère avancée du trait de côte, au droit du bourg de Villerville, associée à l'implantation d'ouvrages de protection (enrochement et épis) au pied du bourg depuis le début du 19<sup>ème</sup> siècle ;

- un recul modéré entre 7 et 20 m au Cirque des Graves dans des matériaux hétérogènes constitués par des blocs de craie et des marnes assez résistantes. Ce faible recul s'explique probablement par la nature du matériau et par l'apport en matériau par le glissement du versant vers l'aval ;

- une stabilité du trait de côte à partir de la pointe du Heurt (à l'ouest du Cirque des Graves), car ce secteur est constitué de grès très résistants. Pour ce secteur, il est difficile de quantifier précisément les déplacements car leur amplitude faible est comprise dans la marge d'erreur de la source cartographique.

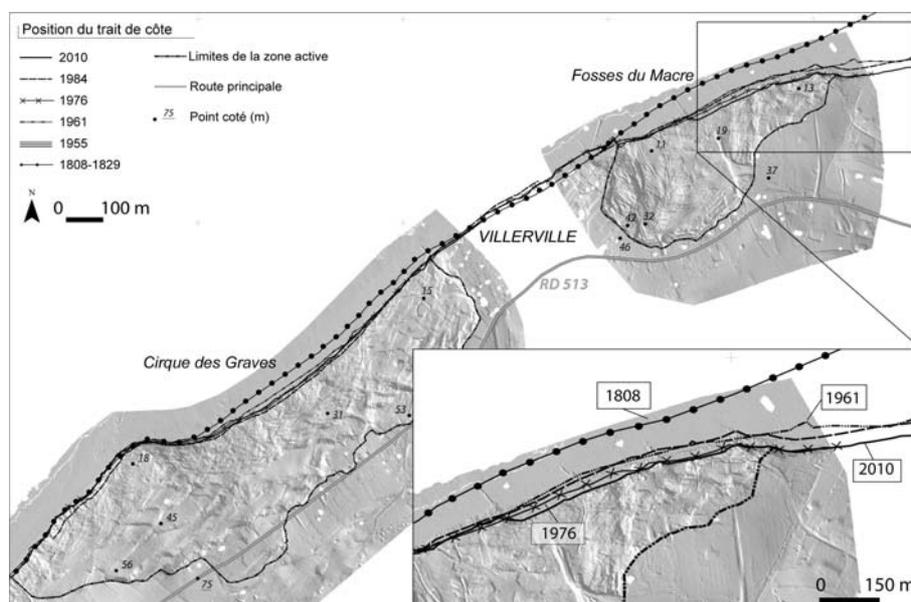


Figure 16. Evolution de la position du trait de côte entre 1808 à 2010 au Cirque des Graves et au Fosses du Macre

## 5. Conclusion

Les déplacements historiques d'un versant littoral instable de Villerville (Calvados) et la mobilité du trait de côte sont étudiés à partir de données géospatiales multi-sources sur deux siècles. Si cette méthode par comparaison de documents cartographiques et de photographies aériennes est très répandue en géomorphologie fluviale et littorale, elle est peu utilisée pour étudier les glissements de terrain car elle nécessite l'accès à de nombreuses données historiques et l'identification de 'marqueurs' fiables au cours du temps. Une méthodologie

d'analyse prenant en compte l'incertitude sur les données et l'identification des 'marqueurs' est proposée. La méthodologie est adaptée à l'étude de versants dont les déplacements sont d'ordre pluri-métriques (amplitude supérieure aux marges d'erreurs liées aux sources). Ces déplacements sont mesurés à l'aide de 'marqueurs' du paysage (limites de parcelles, limites de bâtiments, tracés de routes et de chemins) identifiés sur les différentes sources. Leurs positions successives sont comparées sur les différentes sources ce qui permet d'estimer des déplacements sur une longue période. Les informations fournies par les documents cartographiques et les photographies aériennes ont été complétées par l'interprétation d'archives ou de témoignages.

Cette méthode est fondée sur une grande diversité de sources, ce qui implique une forte variabilité de qualité en termes d'échelle spatiale, de résolution et de contenu d'information. Elle induit des erreurs de positionnement géométrique spécifiques à chaque document qui ont été définies par des indices de qualité. Les déplacements historiques estimés à partir de ces sources sont en accord avec les observations actuelles acquises par des relevés de terrain.

L'étude a permis de mettre en évidence qu'entre 1808 (date du document cartographique utilisé le plus ancien) et 1982 (date de la 1<sup>ère</sup> accélération majeure référencée et bien documentée), le versant était instable avec des déplacements lents et continus dans le temps. Les probables petits réajustements, sans grande accélération brutale, ont permis aux habitants qui se sont progressivement installés de s'accommoder de cette instabilité 'permanente'. Elle montre également une forte variabilité spatiale des déplacements qui est assez conforme aux facteurs de prédisposition (structure géologique avec compartimentage lié aux panneaux de craie, occupation du sol, topographie) et aux forçages (hydrologie, action érosive de la mer). En restant prudent, compte tenu des marges d'erreur parfois élevées sur certains documents, il apparaît assez clairement que les secteurs les plus actifs actuellement, l'étaient aussi par le passé, sur la période considérée. Il en est de même pour les secteurs les moins actifs. Des ordres de grandeur des déplacements pendant la 1<sup>ère</sup> accélération de 1982 sont également proposés ; ceux-ci auraient atteints des valeurs comprises entre 3,50 m à l'amont et 7,00 m à l'aval. Cette étude a donc permis, malgré les différentes incertitudes, d'accéder à des ordres de grandeurs de déplacements et de confirmer et renforcer les hypothèses émises sur le zonage futur des zones actives à partir de l'activité récente (depuis 1982), dans la perspective de la cartographie de l'aléa mouvements de terrain.

### **Remerciements**

Cette recherche a été réalisée avec le support des projets : ANR JC 'ECOSGIL : *Extraction des Connaissances Spatiales pour la Gestion Intégrée du Littoral*', ANR Risk-Nat 'SISCA : *Système intégré de Surveillance de Crises de glissements de terrain argileux*' et du CPER 2007-2013 'GR2TC : *Gestion des Ressources, Risques et Technologie du domaine Côtier*'. Le levé LiDAR aéroporté a été acquis dans le

cadre du projet européen SafeLand 'Living with Landslide Risk in Europe' (2009-2012).

## Bibliographie

- Albinet V., (2001). Recul des falaises et alimentation de l'estran en sédiments : essai d'évaluation volumétrique pour la côte de la Bernerie et des Moutiers-en-Retz (Loire Atlantique). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. 7, n°1, p. 41-46.
- Bonnard C. (2006). Évaluation et prédiction des mouvements des grands phénomènes d'instabilité de pente. *Bulletin für angewandte Geologie*, vol. 11/2, p. 89-100.
- Bromhead E.N., Hopper A.C., Ibsen M.L., (1998). Landslides in the Lower Greensand escarpment in south Kent. *Bull. of Engineering Geology and the Environment*, 57, p. 131-144.
- Brunsdon D., Ibsen M.L. (1993). The nature of European archive of historical landslide data, with specific reference to the United Kingdom. *Temporal occurrence and forecasting of landslides in European community – Contract EPOCH n° 90 0025 (DTEE)*, Final report, p. 241-258.
- Casson B. (2004). *Apports de l'imagerie optique haute résolution pour l'étude 3D des glissements de terrain*. Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard – Lyon 1.
- Chegaray J. (1992). *L'étonnante histoire de Villerville: des origines à 1945*. Presses de Lettr'im Caen.
- Costa S. (1997). *Dynamique littorale et risques naturels: L'impact des aménagements, des variations du niveau marin et des modifications climatiques entre la baie de Seine et la baie de Somme*. Thèse de doctorat, Université de Paris I.
- Delacourt C., Allemant P., Berthier E., Raucoules D., Casson B., Grandjean P., Pambrun C. Varel E. (2007). Remote-sensing techniques for analysing landslide kinematics: a review. *Bulletin de la Société Géologique de France*, vol. 178, n° 2, p. 89-100.
- Dikau R., Brunsdon D., Schrott L., Ibsen M. (1996). *Landslide recognition: identification, movement, and causes*. Wiley.
- Dornbusch U., Robinson D., Moses C., Williams R.B.G. (2006a). Chalk coast erosion and its contribution to the shingle budget in East Sussex. *Geomorphology*, Supplement, vol. 144, p. 215–230.
- Dornbusch U, Robinson D, Moses C, Williams R, Costa S. (2006b). Retreat of Chalk cliffs in the eastern English Channel during the last century. *Journal of Maps*, p.71–78.
- DUTI, (1986). *Détection et utilisation des terrains instables*, Projet d'École, Rapport final sur le glissement de La Frasse et annexes. École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Fall M., Azzam R., Noubactep C. (2006). A multi-method approach to study the stability of natural slopes and landslide susceptibility mapping. *Engineering Geology*, n° 82, p. 241–263.
- Flageollet J.-C., Helluin E. (1984). Formations quaternaires et zonage des risques de glissements de terrain à Villerville et Cricqueboeuf (Calvados). In: *Actes du Colloque*

- "Mouvements de terrain" 1984, Documents du BRGM, n° 83, Ed. BRGM, Orléans, p. 41-46.
- Flageollet J.C, Helluin E. (1987). Morphological investigations of the sliding areas along the coast of Pays d'Auge, near Villerville, Normandy, France. In: *Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on Geomorphology*, vol. 1, p. 477-486.
- Flaubert G. (1924). *Oeuvres complètes illustrées : Par les champs et par les grèves. Pyrénées-Corses*. Illustration de G. Dufrenoy. Ed. du Centaure, Paris, Librairie de France.
- Glade T., Albini P., Frances F. (2001). The use of historical data in natural hazard assessments. *Advances of Technological and Natural Hazard Research*, Kluwer, vol. 17.
- Grosso E., (2010). Service d'intégration de données anciennes dans un référentiel récent. *Journées de la Recherche IGN 2010*.
- Hénaff H., Lageat Y., Costa S., Plessis E. (2002). Modalités du recul des falaises crayeuses du Pays de Caux : détermination des processus d'érosion et quantification des rythmes d'évolution. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, n° 2, p. 107-118.
- Hughes M.L., McDowell P.F., Marcus A.W. (2005). Accuracy assessment of georectified aerial photographs: Implications for measuring lateral channel movement in a GIS. *Geomorphology*, vol.74, p. 1-16.
- Ibsen M.L., Brunsden D. (1996). The nature, use and problems of historical archives for the temporal occurrence of landslides, with specific reference to the south coast of Britain, Ventnor, Isle of Wight. *Geomorphology*, vol. 15, p. 241-258.
- Jongmans D., Garambois S. (2007). Geophysical investigations of landslides: a review. *Bulletin Société Géologique de France*, vol. 178, p.101–112.
- Kasser M., Egels Y. (2001). *Photogrammétrie numérique/Digital photogrammetry*. Taylor and Francis, London.
- Kasperski J., Delacourt C., Allemand P., Pothérat P. (2010). Evolution of the Sedrun landslide (Graubünden, Switzerland) with ortho-rectified air images. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 69, p.421-430.
- Lissak C., Maquaire O., Malet J.-P. (2009). Role of hydrological process in landslide occurrence: Villerville-Cricqueboeuf landslides (Normandy coast, France). In: Malet, J.-P., Remaître, A., Boogard, T.A. (Eds) *Proceedings of the International Conference on Landslide Processes: from geomorphologic mapping to dynamic modeling 2009*, Strasbourg, CERG Editions, p. 175-180.
- Lissak C., Maquaire O., Malet J.-P., (2010). A multi-technique approach for characterizing the geomorphological evolution of a Villerville-Cricqueboeuf coastal landslide (Normandy, France). Geophysical Research Abstract Vol. 12, EGU2010-7866, *EGU General Assembly, 2010*.
- Malet J.-P., Maquaire O., Calais E. (2002). Le GPS en géomorphologie dynamique. Application à la surveillance de mouvements de terrain (Super-Sauze, Alpes du Sud, France). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. 8, n° 2, p. 165-180.
- Malte-Brun V.A. (1881). *La France illustrée : géographie, histoire, administration statistique*. Editeur J. Rouff, Paris.
- Maquaire O. (1990) *Les mouvements de terrain de la côte du Calvados. Recherches et prévention*. Documents du B.R.G.M., n° 197. Éditions du B.R.G.M.

- Martin, B., Weber, D. (1996). Vitesses de déplacement des mouvements de terrain à Vars (Hautes-Alpes, France) : le recours aux archives et à la topométrie. *Revue de Géographie Alpine*, vol. 84, n°2, p. 57-66.
- Miserez A., Gabus J.H., Koelbl O., Stuby J.-J., Dupraz H., Durussel R., Engel T. (1982). Divers articles relatifs aux travaux de mensuration sur le glissement de La Frasse. *Revue Mensuration, Photogrammétrie, Génie Rural*, 1982. In DUTI 1986
- Noverraz F., Bonnard C. (1990). Mapping methodology of landslides and rockfalls in Switzerland. *Proc. VI<sup>th</sup> Int. Conf. and Field Workshop on Landslides 1990*, Université de Studi, Milano, p. 43-53.
- Payraudeau S., Galliot N., Liébault F., Auzet A.V. (2008). Incertitudes associées aux données géographiques pour la quantification des vitesses de migration des méandres. Application à la Basse Vallée de la Bruche, *SAGEO 2008*.
- Pierre G., Lahousse P. (2003). Méthodes de quantification du recul des falaises : l'exemple du cap Blanc-Nez (Pas-de-Calais, France) ». *Hommes et Terres du Nord*, 1, p. 32-43.
- Pierre G., Lahousse G. (2004). L'évolution des falaises argilo-crayeuses et limoneuses du nord Boulonnais (Strouanne, Sangatte, France). *Géomorphologie*, n°3, 2004, p. 211-224.
- Richards J.E. (1986) *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction*, Springer, New York.
- SisFrance, Sismicité de la France, <http://www.sisfrance.net>, Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM).
- Turner A.K., Schuster R.L. (1996). *Landslides: investigation and mitigation*. Transportation Research Board - National Research Council, Special Report 247, Washington, D.C., National Academy Press.